第 37 卷第 7 期
2017 年 4 月

生　态　学　报
ACTA ECOLOGICA SINICA

Vol.37,No.7
Apr.,2017

DOI: 10.5846/stxb201511242377

孙金华,毕银丽,王建文, 张延旭,于淼, 孙江涛.接种 AM 菌对西部黄土区采煤沉陷地柠条生长和土壤的修复效应.生态学报,2017,37(7):2300-2306.

Sun J H, Bi Y L,Wang J W, Zhang Y X, Yu M, Sun J T.Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on the growth of *Caragana korshinskii* Kom. and soil improvement of coal mining subsidence in the Loess Area of West China.Acta Ecologica Sinica,2017,37(7):2300-2306.

接种 AM 菌对西部黄土区采煤沉陷地柠条生长和土壤的修复效应

孙金华[1],毕银丽[1,*],王建文[2], 张延旭[1],于　淼[1], 孙江涛[1]

1 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京　100083

2 陕西煤化集团柠条塔矿, 榆林　719300

摘要:以采煤沉陷区柠条为宿主植物,研究接种丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungi,简称 AM 菌)对柠条生长和根际土壤的改良效应。结果表明:8 月份接种 AM 菌比不接菌柠条的株高、冠幅和地径显著增加了 29.11%,29.83%和 14.81%,9 月份接菌区柠条的根长、平均直径、根表面积和根体积分别比对照区增加了 151.0%,34.2%,116.0%和 129.3%。接种 AM 菌增强柠条的抗逆性,接菌区的柠条叶片可溶性糖含量和过氧化氢酶活性分别比对照区增加了 13.4%和 111.1%。8 月份接种 AM 菌改善了土壤的生物理化性质,接菌区有机质、碱解氮、速效磷和速效钾比对照区分别增加 7.06 g/kg,140.0 mg/kg,1.82 mg/kg 和 16.72 mg/kg,接种 AM 菌显著增加了根际土壤中真菌、放线菌、细菌数量和酸性磷酸酶活性。总之,接种 AM 菌促进采煤沉陷区柠条的生长和土壤的改良。

关键词:丛枝菌根真菌;柠条;根际土壤

Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on the growth of *Caragana korshinskii* Kom. and soil improvement of coal mining subsidence in the Loess Area of West China

SUN Jinhua[1], BI Yinli[1,*],WANG Jianwen[2], ZHANG Yanxu[1], YU Miao[1], SUN Jiangtao[1]

1 *College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing* 100083, *China*

2 *Ningtiao Tower Mine of Shanxi Coal Group, Yulin* 719300, *China*

Abstract: China is a country with large amount of consumption and production of coal. However, the exploitation and utilization of coal have resulted in series of ecological environmental problems. The main problem is the destruction of land resources, as coal mining is occupies a large amount of land and destroys surface vegetation. This leads to land subsidence and a large number of cracks, which injures plant roots, thereby affecting plant growth and nutrient uptake, increasing soil nutrients and moisture loss, and reducing soil fertility. As a result, research has been focused on the ecological restoration of mining areas in recent years, including the use for microbial reclamation of arbuscular mycorrhizal (AM) fungi that can form a symbiotic association with > 80% terrestrial plants. They promote the absorption and utilization of mineral elements and growth of plants, and improve the plants resistance to adverse environment. The effect of AM fungi on the restoration of the mining areas with sandy substrates has been previously studied. However, little is known about the effect of AM fungi on the vegetation and soil restoration in loess mining areas. The present study determined the effects of AM fungi on the growth

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51574253); 国家 863 计划(2013AA102904)

收稿日期:2015-11-24;　　**网络出版日期**:2016-08-30

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: ylbi88@126.com

of the host, *Caragana*, a loess pioneer plant, and the improvement of rhizosphere soil. The results show that the height, crown, and ground diameter of *Caragana* inoculated by AM fungi were greater by 29.11%, 29.83%, and 14.81%, respectively in August, than in non-inoculated plants in September. The root length, average diameter, surface area, and root volume of inoculated *Caragana* were greater by 151%, 34.2%, 116.0%, and 129.3%, respectively, than those of the control. In addition, inoculation of AM fungi enhanced *Caragana* resistance; the soluble sugar content and catalase activity in the leaves of inoculated *Caragana* increased by 13.4% and 111%, respectively. Moreover, *Caragana* inoculated with AM improved the biological, physical, and chemical properties of soil; the organic matter, available nitrogen, phosphorus, and potassium increased by 7.06 g/kg and 140, 1.82, and 16.72 mg/kg, respectively in August. Inoculation with AM significantly increased the number of fungi, actinomycetes, and bacteria, and also increased acid phosphatase activity of the rhizosphere soil. Therefore, AM fungal inoculation promoted *Caragana* growth and soil improvement in loess coal mining subsidence areas.

Key Words: arbuscular mycorrhizal fungi; *Caragana*; rhizosphere soil

近年来,煤炭生产和消费约占我国主体能源的 70%,煤炭在能源体系中的主体地位不可替代[1]。柠条塔是陕西煤业化工集团旗下的大型现代化煤炭矿区,地处气候干旱、地貌复杂、土质疏松、土壤贫瘠、水土流失严重的西部黄土区,它经过多次沉陷,重复多次对植物根系拉伤,该采煤沉陷区的生态环境较一般采煤沉陷地更加脆弱。另外,黄土具有土壤孔隙大、紧实度小、保水保肥能力差、有机质和矿物质含量低等特质,大规模的煤炭开采势必对该区脆弱的生态环境产生更大的危害[2]。其中最严重的就是对土地资源的破坏,占用大量土地和破坏地表植被,造成地表沉陷并产生大量裂隙,引起植物根系拉伤,影响植物生长和营养物质的吸收,土壤养分和水分极易流失,肥力下降。柠条(*Caragana Korshinskii* Kom.)属豆科锦鸡儿属落叶灌木,是柠条塔矿区先锋植物,它具有耐旱、耐寒、耐沙埋和分枝结实性好等特性,多用于沙区退化草地植被恢复[3-4]。煤炭开采沉陷使柠条的生存环境遭到破坏,影响其生长和发育。因此,寻找解决采煤沉陷区土壤退化和植被生长缓慢的方法迫在眉睫。

丛枝菌根真菌能与 80%的陆生植物形成互惠共生关系[5],并能促进植物生长和矿质营养元素的吸收利用[6],提高植物的抗逆性[7]。有研究发现 AM 菌能减少土壤营养流失[8]。近几年,丛枝菌根真菌在矿区微生物复垦中发挥着至关重要的作用[9]。但是这些研究多注重 AM 菌对沙土矿区修复的生态效应[10],而 AM 菌对黄土矿区植物的修复效应以及土壤的改良效应研究不足。鉴于此,为深刻了解黄土基质条件下,接种丛枝菌根真菌对矿区植被和土壤的修复效应,本文以西部黄土区采煤沉陷地的柠条作为宿主植物,研究接种 AM 菌对黄土的改良效应以及对柠条生长发育的作用。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

柠条塔矿区位于陕西省榆林市神木县西北部,地处毛乌素沙漠与黄土丘陵沟壑区的过渡地带,陕北黄土高原北部,毛乌素沙漠东南缘,地理坐标 110°06′—110°20′E,38°70′—39°10′N,属于干旱半干旱的大陆性季风气候,常年干旱少雨,植被稀疏,水土流失严重,多大风易起沙尘暴,夏季炎热多雨,日温差大,7、8 月多雷阵雨及阵性大风天气,秋季凉爽湿润,气温下降快。本研究采煤沉陷区位于柠条塔开采工作面 N1114 以西,N1206 以东区域。与同等采煤规模的大柳塔矿区相比,大柳塔以沙土为主,成土母质是风积沙,它质地较粗,通气性强,透水性好,但是持水保肥能力极差,土壤结构以沙粒为主,易遭风蚀;而该区土壤以黄绵土为主,黄土是粉砂质土状堆积物,垂直节理发育,受水浸湿后会产生较大沉陷,熟化后可形成大小不同的团粒、团块结构,孔隙率高,耕性好,具有良好透水性,可蓄积大量有效水分,但保肥性能是比较差的,氮素缺乏,全磷含量虽较高,但因活性碳酸钙的富集,致使作物生长过程普遍缺磷,并且有机质含量较低。

1.2 试验材料

(1)试验植物:柠条(*CaraganaKorshinskii* Kom.)。

(2)试验菌株:供试菌种由北京市农林科学研究院植物营养与资源研究所微生物室提供,后经中国矿业大学(北京)微生物复垦实验室增殖培养得到的内生菌根真菌菌种摩西球囊霉菌 *Glomus mosseae*(简称 G.m),菌剂菌丝密度是 5.97m/g,孢子密度是 30 个/10g。

1.3 试验设计

试验分为接菌区(G.m)和对照区(CK)。2014 年 5 月开始种植柠条,接菌和对照区地形和土质相同,接菌区和对照区总面积为 11512m^2,每个小区播种穴行间距 1m,接菌区是 6380 株,对照区是 5132 株。菌剂随柠条种子埋入播种穴,每穴 1 株,每株 20g。浇水达土壤最大饱和持水量,以后每周浇水 1 次,1 个月后免水分自然管理。2015 年 8 月 S 型随机选取接菌区和对照区 50 株柠条测定植株株高、冠幅,地径和叶片叶色值,并对监测的植物做标记,补施一次菌剂,剂量为 50g/株,2015 年 9 月再重新测定上述指标。

1.4 样品采集

分别在接菌和对照区随机选取植株大小相似的 15 个样点并做标记,8 月采集新鲜根际土壤样并且编号。将土样装入自封袋带回实验室,根际土风干后剔除杂物过 1mm 筛备用。9 月除采集根际土样用于分析其理化性质外,还采集新鲜土样和叶片,自封袋密封存于 4℃冰盒,迅速带回实验室放入 4℃冰柜冷藏,用于分析植物叶片抗逆性指标可溶性糖和过氧化氢酶活性,新鲜土样用于测定微生物数量和酸性磷酸酶活性。

1.5 测定指标和方法

(1)柠条生长量和根系指标

用游标卡尺测量植株地径,用钢尺测量株高和冠幅,根系生长形态特征用 CI-600(美国生产)植物根系生长监测系统扫描获得数据,它可以扫描不同深度的根系分布或土壤剖面图像,通过根系分析软件 RootSnapVersion1.2.9.30 获得根系生长的各项指标。

(2)菌根侵染率和菌丝密度

用 Phillip 和 Hayman 的 KOH 脱色-曲利苯蓝染色法,玻片镜检测定侵染根段数[11]。计算菌根侵染率公式:菌根侵染率=菌根段数/被检根段数×100%[12]。菌丝密度采用真空泵微孔滤膜抽滤-网格交叉法测定[13]。

(3)根际土壤生物理化指标

pH 值为水土比 2.5∶1 的玻璃电极-酸度计法,电导率(Electrical Conductivity 简写 EC)为水土比 5∶1 浸提-电导法,有效磷为 0.5mol/L $NaHCO_3$浸提-钼锑抗比色法,速效钾为 1.0mol/LNH_4OAc 浸提-火焰光度法,土壤有机质含量的测定采用重铬酸钾外加热方法($K_2Cr_2O_7$-H_2SO_4法)。土壤速效氮含量采用碱解扩散法[14]。土壤微生物数量的测定采用常规的稀释平板法[15],其中,细菌采用牛肉膏蛋白胨培养基,放线菌采用改良高氏一号培养基,真菌采用孟加拉红培养基。酸性磷酸酶活性的测定采用改进的 Tabatabai&Brimner 法[16],酶活性用单位时间每克土产酚量(mg g^{-1} h^{-1})表示。

(4)叶片指标

叶片叶色值用 SPAD-502(日本生产)测定,操作方法是取 4—5 不同层叶片测得每个叶片的叶色值,取平均值作为整个植株叶片叶色值。柠条光合速率用 LI-6400XT(美国生产)光合仪测定,过氧化氢酶活性采用 pH7.8 磷酸缓冲液提取粗酶液的分光光度法,还原糖含量采用蒽酮比色法[17]。

1.6 其他指标计算

菌根贡献率(%)=(接种处理植物指标-不接种植物指标)/接种处理植物指标×100%

1.7 数据处理方法

数据处理采用 Excel 2007 软件,运用 SPSS 17.0 对处理后的数据进行单因素方差分析(LSD 检验法,显著水平设置 0.05)。

2　结果与分析

2.1　接种 AM 菌对柠条生长的影响

接种 AM 菌能显著促进柠条的生长,从表 1 可以看出,8 月份柠条的株高、冠幅和地径均表现为接菌区(G.m)>对照区(CK),且差异性显著($P<0.05$),接菌区比对照区的柠条的株高、冠幅和地径增加 29.11%,29.83%和 14.81%。9 月份柠条的株高、冠幅和地径也表现为接菌区>对照区,但差异性不显著。可能由于 AM 菌在柠条生长旺盛期发挥重要作用,在柠条生长后期,菌根的效应随着植物的生长逐渐减弱。

表 1　AM 真菌对柠条生长的影响

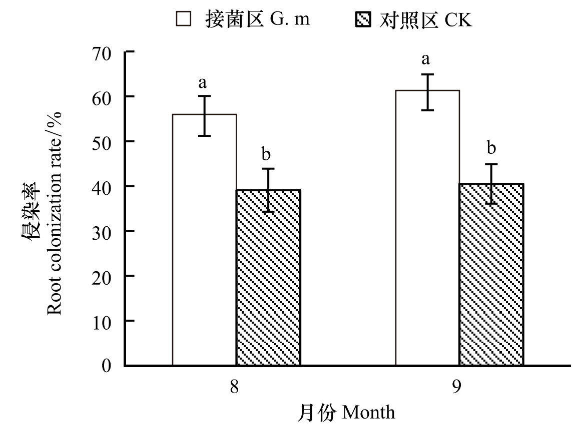
Table 1　Effect of AM fungi on growth of Caragana

监测时间 Monitoring time	监测指标 Monitoring indexes	摩西球囊霉菌 *Glomus mosseae* G.m	CK
8 月 August	株高	29.36±1.37a	22.74±1.10b
	冠幅	24.46±1.16a	18.84±0.71b
	地径	0.31±0.009a	0.27±0.009b
9 月 September	株高	32.76±1.26ab	30.12±0.62a
	冠幅	26.64±1.27ab	23.22±1.26a
	地径	0.33±0.010ab	0.32±0.007a

表中±前数值为 50 个重复的平均值,±后数值为重复样标准误差; 其后不同字母代表 5%水平上的差异显著性

2.2　AM 菌对根系侵染率和菌丝密度的影响

根系侵染率能反映丛枝菌根真菌与植物的亲密结合程度。本研究发现 AM 菌对柠条的侵染率接菌区显著高于对照区(图 1,图 2),8 月和 9 月份的接菌区的菌根侵染率分别为 56.0%和 61.3%。其菌丝密度分别为 4.09m/g 和 4.36m/g。表明 AM 菌能与柠条形成良好的互惠共生的关系,并能在土壤中形成较密的菌丝网络,增强植物对土壤中营养元素的吸收利用。



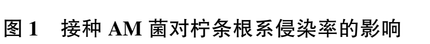

图 1　接种 AM 菌对柠条根系侵染率的影响

Fig.1　Effect of AM fungi inoculation on root infection rate of Caragana

图 2　接种 AM 菌对菌丝密度的影响

Fig.2　Effect of AM fungi inoculation on hyphal density

2.3　接种 AM 菌对柠条根系生长的影响

根系是植物吸收水分和养分的重要器官,根系的生长发育影响植物生长和生存。接种 AM 菌可刺激柠条根系的生长发育(表 2)。接菌处理和未接菌处理根长、平均直径、根表面积和根体积之间的差值主要源于接种丛枝菌根真菌的作用,从而获得其菌根贡献率。表 2 中 AM 菌对根长、根平均直径、根表面积、根体积和根尖数的贡献率分别为 60.2%、25.5%、53.7%、56.4%和 13%。接菌区柠条的根长、根平均直径、根表面积和根体

积均显著大于对照区,分别比对照区增加了 151.0%,34.2%,116.0%和 129.3%。虽然接菌区根系的根尖数大于对照区,但差异性不显著。

2.4 接种 AM 菌对柠条抗逆性影响

叶色值反映了植物叶片中叶绿素含量,也是决定光合速率的重要因子之一。接菌区柠条的叶色值和光合速率均显著高于对照区(表 3),接菌区分别是对照区的 1.07 和 3.17 倍,表明接种 AM 真菌能显著提高植物光合作用,促进柠条糖类物质的积累。叶片中的可溶性糖是一种重要的渗透调节物质,在干旱胁迫条件下它的变化可以反映对不良环境的适应能力。叶片中过氧化氢酶活性的高低体现了对叶片有伤害作用的氧自由基的清除能力。研究中发现接菌区的过氧化氢酶活性和可溶性糖含量均大于对照区,且差异性显著。接种 AM 真菌可使叶片中可溶性糖的含量增加 13.4%,使过氧化氢酶活性增加 111.1%,极大地提高了柠条的抗逆性。叶色值、光合速率、可溶性糖和过氧化氢酶活性的菌根贡献率分别为 6.9%、68.4%、11.8%和 52.6%。菌根对叶色值的贡献较小,是因为植物处于落叶期,菌根效应较小。

表 2 AM 真菌对柠条根系生长的影响

Table 2 Effect of AM fungi on growth of Caragana root

接菌处理 Inoculation treatment	根长/cm Root length	平均直径/mm Mean diameter	根表面积/cm^2 Root superficial area	根体积/cm^3 Root volume	根尖数/个 Root tips number
G.m	194.30±20.51a	2.00±0.19a	158.34±11.76a	6.58±1.18a	100±25.48a
CK	77.41±9.45b	1.49±0.03b	73.32±21.76b	2.87±0.92b	87±27.27a
菌根贡献率/% Contribution rate of AMF	60.2	25.5	53.7	56.4	13

表中±前数值为 5 个重复的平均值,±后数值为重复样标准误差;其后不同字母代表 5%水平上的差异显著性

表 3 AM 菌对柠条抗逆性影响

Table 3 Effect of AM fungi on the stress resistance of Caragana

接菌处理 Inoculation treatment	叶片叶色值(SPAD) Leaf color value	光合速率 Photosynthetic rate/ ($\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$)	可溶性糖含量 Soluble sugar content/ (g/kg)	过氧化氢酶活性 Catalase activity/ ($U\ kg^{-1}\ min^{-1}$)
G.m	40.34±0.527a	0.38±0.022a	1.27±0.035a	0.19±0.018a
CK	37.54±1.112b	0.12±0.018b	1.12±0.049b	0.09±0.018b
菌根贡献率/% Contribution rate of AM fungi	6.9	68.4	11.8	52.6

表中±前数值为 10 个重复的平均值,±后数值为重复样标准误差;其后不同字母代表 5%水平上的差异显著性

2.5 接种 AM 菌对矿区土壤性质的影响

接种丛枝菌根真菌能显著改善土壤的肥力状况(表 4),8 月份接菌区的 pH 显著低于对照区,表明 AM 菌降低土壤碱度,促使土壤中盐基离子的活化,增强柠条对矿质元素的吸收利用能力;土壤电导率也表现为接菌区>对照区,且差异性显著。但 pH 和电导率在 9 月份接菌区和对照区的差异性不显著,可能是由于菌根在柠条落叶期时孢子逐渐形成,菌根效应减弱。土壤中有机质、碱解氮、速效磷含量均表现出接菌区>对照区,且差异性显著。8 月份接菌区有机质、碱解氮、速效磷和速效钾接菌区比对照区分别增加 7.06 g/kg,140.0 mg/kg,1.82 mg/kg 和 16.72 mg/kg。表明接种 AM 菌显著改善了土壤的养分含量,对因煤炭开采造成的土壤养分流失起到一定缓解作用,为生态脆弱的矿区土壤的改良提供较好的途径。9 月份接菌区有机质、碱解氮、速效磷和速效钾比对照区分别增加 4.02 g/kg,80.0 mg/kg,1.22 mg/kg 和 10.2 mg/kg。虽然接菌区土壤养分含量显著高于对照区,但增加的幅度下降,可能是柠条生长后期菌根效应减弱。

土壤中微生物是元素迁移转化的承载者,在根际土壤微环境中发挥着至关重要的作用。真菌、放线菌和细菌数量均表现接菌区>对照区(表 5)。接菌区真菌、放线菌和细菌数量是对照区的 2.23、1.53、2.98 倍,表明接种丛枝菌根真菌能显著提高土壤中的微生物数量,但接菌和对照区细菌、真菌和放线菌数量的排序不变,均是细菌数>放线菌数>真菌数。土壤中酸性磷酸酶活性对植物的可利用磷的释放起着关键性作用,由表 3 可

以看出,接菌区的酸性磷酸酶活性增加了 25%,这也解释了接菌区土壤速效磷含量高的原因。

表 4　AM 菌对矿区土壤的理化性质的影响

Table 4　Effects of AM fungi on the physical and chemical properties of soil in mining area

监测时间 Monitor time	接菌处理 Inoculation treatment	pH	EC Electrical conductivity/(mS/cm)	有机质 Organic matter/(g/kg)	碱解氮 Alkali-hydrolyzable nitrogen/(mg/kg)	速效磷 Available phosphorus/(mg/kg)	速效钾 Available potassium/(mg/kg)
8 月 August	G.m	8.66±0.099a	0.15±0.006a	12.12±1.41a	260.0±21a	3.49±0.165a	52.92±6.46a
	CK	9.04±0.06b	0.12±0.002b	5.06±0.949b	120.0±11b	1.67±0.202b	36.20±2.89b
9 月 Septemper	G.m	8.69±0.075a	0.16±0.005a	16.15±1.69a	210.0±15a	3.55±0.237a	54.46±1.99a
	CK	8.79±0.052a	0.15±0.004a	12.13±1.87b	130.0±8b	2.33±0.148b	44.26±3.35b

表中±前数值为 15 个重复的平均值,±后数值为重复样标准误差。其后不同字母代表 5%水平上的差异显著性

表 5　AM 菌对矿区土壤微环境的影响

Table 5　Effects of AM fungi on the micro-environment of soil in mining area

接菌处理 Inoculation treatment	真菌数量 Fungi number/(10^3 cfu/g)	放线菌数量 Actinomycetes number/(10^5 cfu/g)	细菌数量 Bacteria number/(10^6 cfu/g)	酸性磷酸酶活性 Acid phosphatase activity/($\mu g\ g^{-1}\ h^{-1}$)
G.m	2.90±0.690a	5.67±0.369a	4.08±0.717a	3.87±0.225a
CK	1.3±0.125b	3.71±0.275b	1.37±0.254b	3.09±0.107b

表中±前数值为 10 个重复的平均值,±后数值为重复样标准误差;其后不同字母代表 5%水平上的差异显著性

3　讨论

3.1　接种 AM 菌对柠条修复效应

柠条塔煤矿开采造成地表沉陷和裂隙,使柠条根系拉伤,原本处于脆弱的生态环境中植被遭到严重的破坏,通过一定的技术手段改善矿区植物生长状况变得尤为重要。接种 AM 菌能提高柠条根系侵染率和菌丝密度,说明柠条能与 AM 菌亲密结合,在土壤中形成庞大的菌丝网络,增加植物对养分和水分的吸收面积。为 AM 菌应用到矿区生态修复奠定了基础。本研究发现接种 AM 菌能促进柠条根系和地上部分的生长。矿区接种 AM 菌的沙蒿[18]和紫穗槐[9]也有相似的结果。另外,水分成为矿区主要的环境胁迫因子,干旱胁迫使叶片做出相应的反应机制,通过合成积累可溶性糖调节细胞渗透压,保护酶系统免遭伤害,增强环境适应能力[19]。有研究发现小麦的抗旱性和可溶糖含量呈正相关关系,相关系数在 0.9 以上[20]。而过氧化氢酶是植物体内保护性酶,可及时清除体内的 H_2O_2,减少植物叶片细胞质膜的伤害,接种 AM 菌能显著提高柠条可溶性糖含量和过氧化氢酶活性,红豆草[7]和玉米[21]接种 AM 菌均能提高过氧化氢酶活性。接菌的牡丹可溶性糖含量增加[22]。由此可见,接种 AM 菌可促进矿区植被修复。

3.2　接种 AM 菌对土壤改良效应

柠条塔矿区属于黄土沟壑区,煤矿开采导致土壤养分和水分流失严重,通过关键技术改善土壤性质尤其重要。N、P 和 K 是植物生长必需的营养元素,同时也是土壤肥力的表征。另外,土壤中的微生物是土壤中最活跃的部分,参与土壤有机质分解、腐殖质形成、土壤养分转化和循环等过程[23]。土壤酶活性是土壤生物活性和土壤生化反应强度反映[24],主要源于微生物活动和植物的分泌物。土壤中的酶和微生物活性高低可以代表土壤中物质代谢的旺盛程度,在一定程度上可反映作物对养分吸收利用与生长发育状况等,是土壤肥力的重要指标[25-26]。本研究发现接种 AM 菌能显著提高土壤中速效 N、P 和 K 的含量,并能增加土壤中细菌、真菌和放线菌数量,促进酸性磷酸酶活性的提高。这与前人研究结果一致[27]。因此,接种 AM 菌可以改善矿区土壤肥力。

4 结论

接种 AM 菌对柠条塔煤炭开采沉陷区退化的黄土和柠条生长具有良好修复效应,本文主要结论如下:

(1)丛枝菌根真菌与柠条形成良好的互利共生关系,并能促进植物生长,接菌区的柠条株高、冠幅和地径均高于对照区,差异性显著。

(2)接种 AM 菌可以刺激柠条根系的生长,改善植物根系生长状态。接菌区柠条根长、根平均直径、根表面积、根体积和根尖数显著高于对照区。接种 AM 菌增强了植物的抗逆性,接菌区增加了柠条可溶性糖含量和过氧化氢酶活性,促进柠条抗旱性提高。

(3)接种 AM 菌改善了土壤的生物理化性质,增加土壤中碱解氮,速效磷和速效钾的含量,提高土壤肥力,接菌增加了土壤中有机质、碱解氮、速效磷和速效钾含量,并显著增加了根际土壤中真菌、放线菌和细菌数量,提高了酸性磷酸酶活性。

(4)本文仅研究了 AM 菌对黄土矿区柠条的修复效应,需进一步加强矿区其他植被和不同土壤的修复效果的研究,完善丛枝菌根真菌对煤炭开采沉陷区生态修复功能。

参考文献(References):

[1] 杨俊哲, 陈苏社, 王义, 高登云, 侯志成, 李强. 神东矿区绿色开采技术. 煤炭科学技术, 2013, 41(9): 34-39.

[2] 马芳. 煤炭开采对生态环境的影响与土地复垦措施. 山西水土保持科技, 2015, (3): 9-11.

[3] 刘任涛, 杨新国, 宋乃平, 柴永青, 王磊, 朱凡. 荒漠草原区固沙人工柠条林生长过程中土壤性质演变规律. 水土保持学报, 2012, 26(4): 108-112.

[4] 刘任涛, 柴永青, 徐坤, 杨明秀, 朱凡. 荒漠草原区柠条固沙人工林地表草本植被季节变化特征. 生态学报, 2014, 34(2): 500-508.

[5] Strullu-Derrien C, Kenrick P, Pressel P, Duckett J G, Rioult J P, Strullu D G. Fungal associations in *Horneophyton ligneri* from the Rhynie Chert (*c*. 407 million year old) closely resemble those in extant lower land plants: novel insights into ancestral plant fungus symbioses. New Phytologist, 2014, 203(3): 964-979.

[6] Lendenmann M, Thonar C, Barnard R L, Salmon Y, Werner R A, Frossard E, Jansa J. Symbiont identity matters: carbon and phosphorus fluxes between *Medicag truncatula* and different arbuscular mycorrhizal fungi. Mycorrhiza, 2011, 21(8): 689-702.

[7] Kong J, Pei Z P, Du M, Sun G, Zhang X. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on the drought resistance of the mining area repair plant Sainfoin. International Journal of Mining Science and Technology, 2014, 24(4): 485-489.

[8] Cavagnaro T R, Bender S F, Asghari H R, Van Der Heijden M G A. The role of arbuscular mycorrhizasn in reducing soil nutrient loss. Trends in Plant Science, 2015, 20(5): 283-290.

[9] 岳辉, 毕银丽, 刘英. 神东矿区采煤沉陷地微生物复垦动态监测与生态效应. 科技导报, 2012, 30(24): 33-37.

[10] 邹慧, 毕银丽, 朱郴韦, 杜涛, 韩博. 采煤沉陷对沙地土壤水分分布的影响. 中国矿业大学学报, 2014, 43(3): 496-501.

[11] Phillips J M, Haymen D S. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. Transactions of the British Mycological Society, 1970, 55(1): 158-161.

[12] 蔡邦平, 陈俊愉, 张启翔, 郭良栋. 中国梅丛枝菌根侵染的调查研究. 园艺学报, 2008, 35(4): 599-602.

[13] Jakobsen I, Abbott L K, Robson A D. External hyphae of vesicular arbuscular mycorrhizal fungi associated with TrifoliumsubterraneumL.Spread of hyphae and phosphorus inflow into roots. New Phytologist,1992, 120(3): 371-380.

[14] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.

[15] 沈萍, 范秀容, 李广斌. 微生物学实验(第三版). 北京: 高等教育出版社, 1999.

[16] 赵兰坡, 姜岩. 土壤磷酸酶活性测定方法的探讨. 土壤通报, 1986, 17(3): 138-141.

[17] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社, 2006.

[18] 于瑞雪, 李少朋, 毕银丽, 张延旭, 孔维平, 王瑾, 陈书琳, 刘生. 煤炭开采对沙蒿根系生长的影响及其自修复能力. 煤炭科学技术, 2014, 42(2): 110-113.

[19] 覃光球, 严重玲, 韦莉莉. 秋茄幼苗叶片单宁、可溶性糖和脯氨酸含量对 Cd 胁迫的响应. 生态学报, 2006, 26(10): 3366-3371.

[20] 王川, 谢惠民, 王娜, 王宏礼. 小麦品种可溶性糖和保护性酶与抗旱性关系研究. 干旱地区农业研究, 2011, 29(5): 94-99.

[21] 张延旭, 毕银丽, 裘浪, 郝艳晓, 邓穆彪, 洪天才, 于淼. 接种丛枝菌根对玉米生长与抗旱性的影响. 干旱地区农业研究, 2015, 33(2): 91-94.

[22] 陈丹明, 郭娜, 郭绍霞. 丛枝菌根真菌对牡丹生长及相关生理指标的影响. 西北植物学报, 2010, 30(1): 131-135.

[23] Rajkumar M, Ae N, Prasad M N V, Freitas H. Potential of siderophore-producing bacteria for improving heavy metal phytoextraction. Trends in Biotechnology, 2010, 28(3): 142-149.

[24] 杨兰芳, 曾巧, 李海波, 闫静静. 紫外分光光度法测定土壤过氧化氢酶活性. 土壤通报, 2011, 42(1): 207-210.

[25] 惠竹梅, 岳泰新, 张瑾, 程建梅, 李华. 西北半干旱区葡萄园生草体系中土壤生物学特性与土壤养分的关系. 中国农业科学, 2011, 44(11): 2310-2317.

[26] 夏雪, 谷洁, 车升国, 高华, 秦清军. 施氮水平对塿土微生物群落和酶活性的影响. 中国农业科学, 2011, 44(8): 1618-1627.

[27] 王瑾, 毕银丽, 张延旭, 洪天才, 裘浪, 陈书琳. 接种丛枝菌根对矿区扰动土壤微生物群落及酶活性的影响. 南方农业学报, 2014, 45(8): 1417-1423.